УДК 621.384.6

ФОРМИРОВАНИЕ МОДУЛИРОВАННЫХ АЗИМУТАЛЬНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

В.П. Казьмин, Е.В. Семенюк

Томский политехнический университет
Тел.: (382-2)-418-907

Описаны свойства азимутально-периодического управляющего магнитного поля бетатрона с дополнительно введенной амплитудной или частотной модуляцией. Рассмотрены особенности формирования таких магнитных полей полюсами гребневого типа. Показано, что число элементов периодичности управляющего поля определяется общим числом гребней N на каждом полюсе, изменением их азимутального положения в пределах полюса и числом однотипных гребней Q. Q должно быть кратно N.

Азимутально-периодические магнитные поля с дополнительно введенной амплитудной или частотной модуляцией могут использоваться для удержания и фокусировки частиц в бетатронах, изохронных циклотронах и ускорителях типа кольцевых фазотронов [1].

В случае использования амплитудной гармонической модуляции азимутальное изменение индукции управляющего магнитного поля в средней плоскости рабочего зазора бетатрона или изохронного циклотрона можно записать следующим образом:

$$B_Z(r, z=0, \theta) = B_{Z0}\left(\frac{r_0}{r}\right)^n \times$$
$$\times\left\{1+\varepsilon(r)\cdot\left[1+M(r)\cdot\cos(P\cdot\theta+\psi)\right]\cdot\cos(N\cdot\theta+\varphi)\right\}, \quad (1)$$

где r, Z, θ – координаты цилиндрической системы; $\varepsilon(r)$, N, φ – амплитуда, частота и фаза основной гармоники управляющего магнитного поля; P, ψ – частота и фаза модулирующей функции; M(r) – глубина модуляции (коэффициент, учитывающий степень изменения амплитуды).

Рассматриваемое магнитное поле будет периодическим на интервале $0...2\pi$ в том случае, если частота P кратна N, либо P и N содержат общий множитель [1].

Амплитудная модуляция приводит к появлению в структуре магнитного поля боковых частот: верхней, частотой (N+P), и нижней – (N–P).

Амплитуды боковых составляющих одинаковы и равны $0,5\cdot\varepsilon(r)\cdot M(r)$.

Амплитудная модуляция сопровождается снижением средней по азимуту индукции управляющего поля, но обеспечивает повышение его фокусирующих свойств.

Увеличение фокусирующих свойств управляющего магнитного поля можно характеризовать его флаттером F:

$$F=\varepsilon^2+\frac{1}{4}\varepsilon^2M^2(r)+\frac{1}{4}\varepsilon^2M^2(r)=$$
$$=\varepsilon^2\left(1+\frac{1}{2}M^2(r)\right).$$

Следовательно, глубину модуляции магнитного поля M(r) желательно иметь по возможности большей, но с ростом M(r) усложняется структура управляющего поля, и оно сложнее формируется.

Значительно больший набор боковых гармоник может дать частотная модуляция.

Учитывая свойства частотно-модулированных колебаний [2], индукция магнитного поля в плоскости Z=0 рабочего зазора ускорителя может быть представлена в виде:

$$B_Z(r, z=0, \theta) = B_{Z0}\left(\frac{r_0}{r}\right)^n \times$$
$$\times\left\{1+\varepsilon(r)\cdot\cos\left[N\cdot\theta+\varphi+L(r)\cdot\sin(P_f\cdot\theta+\lambda)\right]\right\}$$

где P_f – частота дополнительного изменения периодической составляющей поля (модулирующая частота); L – коэффициент, учитывающий степень изменения частоты (коэффициент модуляции); λ – фаза модулирующей частоты.

Положив для простоты $\varphi=\lambda=0$ и, учитывая свойства функций Бесселя, выражение (1) можно записать в виде:

$$B_Z(r, z=0, \theta) = B_{Z0}\left(\frac{r_0}{r}\right)^n \times$$
$$\times\left\{1+\varepsilon(r)\cdot\left[J_0(L)\cdot\cos N\theta+J_1(L)\times\right.\right.$$
$$\times\cos(N+P_f)\theta-J_1(L)\cdot\cos(N-P_f)\theta+$$
$$+J_2(L)\cdot\cos(N+2\cdot P_f)\theta-J_2(L)\cdot\cos(N-2\cdot P_f)\theta+$$
$$+J_3(L)\cdot\cos(N+3\cdot P_f)\theta-J_3(L)\times$$
$$\left.\left.\times\cos(N-3\cdot P_f)\theta+...\right]\right\}. \quad (2)$$

где $J_0(L)$, $J_1(L)$, $J_2(L)$, ... $J_k(L)$ – функции Бесселя порядка 0, 1, 2, ... k от аргумента L.

Согласно (2), управляющее поле с дополнительно введенной частотной модуляцией содержит целый спектр боковых гармоник, амплитуды которых определяются выражением:

$$a_k=\varepsilon(r)\cdot J_k(L), \quad (k = 0, 1, 2, ...).$$

Значения боковых частот будут равны $(N\pm mP_f)$ (m = 1, 2, 3, …).

Обе боковые полосы частот теоретически состоят из бесконечного числа составляющих. На практике некоторыми из них можно пренебречь, а именно теми, номера которых превышают аргумент функции Бесселя.

Из теории колебаний известно, что если $0\le L\le 0,5$, то кроме основной гармоники частотой N необходи-

мо учитывать первую пару боковых гармоник. Если $0,5 \le L \le 1,0,$ то необходимо учитывать основную, первую и вторую пары боковых частот и т.д. [2]. Таким образом, флаттер поля F зависит от коэффициента L. Математическое моделирование показало, что с ростом L магнитное поле деформируется сильнее, и оно сложнее формируется.

Выполненное математическое и физическое моделирование показывает, что формирование азимутально-периодического управляющего поля с дополнительной модуляцией можно осуществить периодическим изменением по азимуту:

1) ширины отдельных гребней (в бетатронах), шимм или секторов (в циклотронах);

2) межполюсного зазора, образованного отдельными гребнями, шиммами или секторами или же магнитодвижущей силы намагничивающих обмоток отдельных секторов;

3) углового расстояния между осями двух соседних гребней, шимм или секторов;

4) гребней, шимм или секторов, выполненных из материалов с разными ферромагнитными свойствами;

5) конфигурации или намагничивающей силы отдельной группы корректирующих витков "гармонического" типа.

Рассмотрим конструкции полюсов электромагнитов бетатронов, которые позволяют создавать модулированные магнитные поля. Так, на рис. 1 показаны конструкции полюсов гребневого типа [3], у которых ширина отдельных гребней периодически меняется по азимуту θ. Общее число гребней на каждом полюсе бетатрона взято равным шести.

Структура магнитного поля, формируемого в рабочем зазоре, определяется общим числом гребней N и типоразмерами гребней Q. Так, при:

– N = 4, Q – может быть равно 2 (два типоразмера, т.е. широкий и узкий гребень).

– N = 6, Q – может быть равно 2 или 3. При Q = 2 имеем 3 широких и 3 узких гребня.

– N = 6, но Q = 3, имеем по два гребня трех типоразмеров.

Таким образом, число однотипных гребней будет равно N/Q, которые необходимо установить в каждом полюсе с чередованием по азимуту.

Изменение ширины гребней $b_{гр}$ (или шимм) приводит к изменению азимутальной протяженности области "сильного" поля и влияет на амплитуду этого поля. Изменение индукции зависит от соотношения $b_{гр}/\delta_0$, где δ_0 – вертикальный размер межполюсного зазора. При $b_{гр} >> \delta_0$ максимальное значение индукции не зависит от ширины гребней (шимм), но м[illegible] протяженность области "сильного" поля. При $b_{гр} \le \delta_0$ максимальное значение индукции будет зависеть от ширины гребня $b_{гр}$.

Таким образом, периодическое изменение ширины гребней (шимм) вызывает амплитудную или частотную модуляцию управляющего поля.

Амплитудную модуляцию азимутально-периодического магнитного поля можно осуществить периодическим изменением межполюсного зазора, образованного торцевыми поверхностями гребней, т.е. изменением высоты h отдельных гребней. Если азимутальное расстояние между соседними гребнями сравнимо с величиной межполюсного зазора, то изменение напряженности поля H связано с изменением межполюсного зазора простой зависимостью:

$$\delta_1 \cdot H_1 = \delta_2 \cdot H_2 = \ldots = \delta_i \cdot H_i = \mathrm{const}.$$

Поэтому для получения дополнительной 10 %-ой амплитудной модуляции достаточно изменить значение межполюсного зазора между отдельными гребнями также примерно на 10 %.

Для бетатронов типа МИБ-4 и МИБ-6 это составляет примерно 4 мм. Следовательно, высоту отдельных гребней необходимо изменить приблизительно на 2 мм.

Порядок чередования гребней различной высоты h зависит от их общего числа N и их типоразмера Q. Очевидно, что Q должно быть кратно N.

Если модуляция магнитного поля осуществляется периодическим изменением углового расстояния α_i между осями двух соседних гребней (шимм), то интервалы определенной угловой протяженности должны повторяться при чередовании не менее двух раз для бетатронов и не менее трех раз для циклотронов. Тогда число интервалов k_i и их угловая протяженность a_i будут связаны с общим числом гребней следующим образом:

$$k_1 + k_2 + k_3 + \ldots + k_i = N;$$

$$k_1 \cdot \alpha_1 + k_2 \cdot \alpha_2 + k_3 \cdot \alpha_3 + \ldots + k_i \cdot \alpha_i = 360°.$$

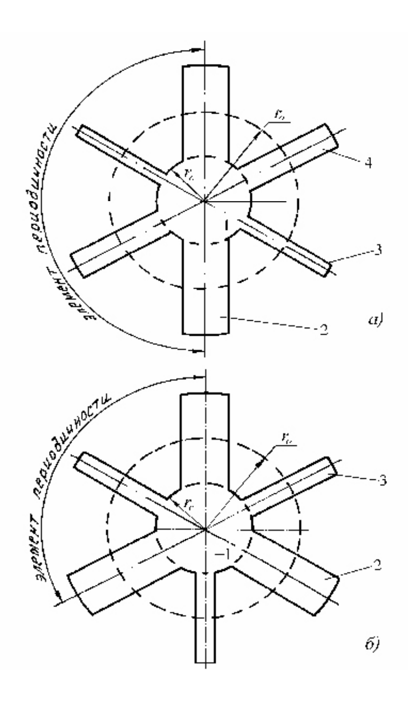
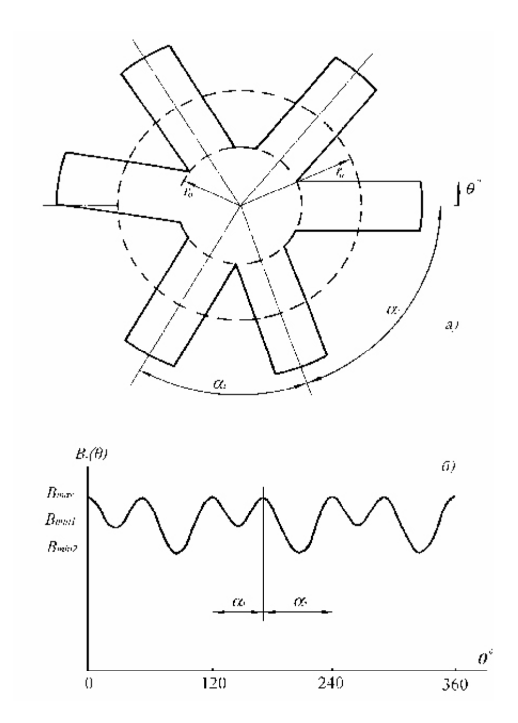


Рис. 1. Схема конструкции полюса с шестью гребнями (вид в плане):
а) с гребнями трех типоразмеров; б) с гребнями двух типоразмеров
1) центральный сердечник; 2) "широкий" гребень; 3) "узкий" гребень; 4) гребень промежуточной ширины



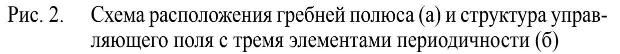


Рис. 2. Схема расположения гребней полюса (а) и структура управляющего поля с тремя элементами периодичности (б)

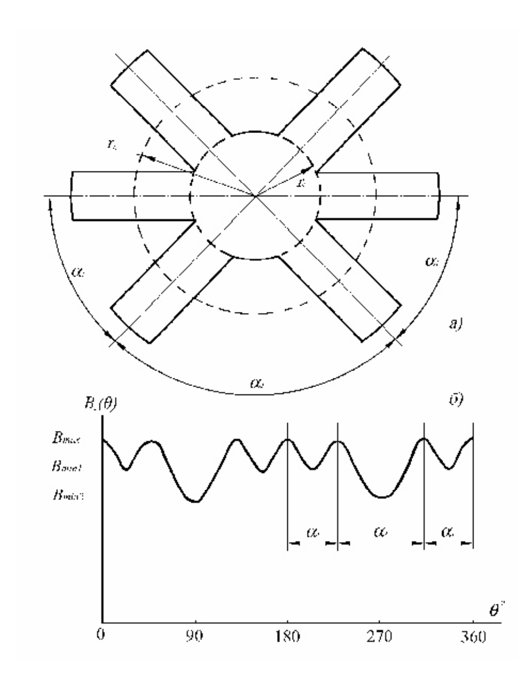


Рис. 3. Схема расположения гребней полюса (а) и структура управляющего поля с двумя элементами периодичности (б)

Возможные конструкции полюсов и примерное изменение индукции B(θ) показаны на рис. 2, 3. Очевидно, что общее число гребней N определяет числс тервалов и возможный диапазон изменения углов α_i.

Модуляцию управляющего магнитного поля можно осуществить и с помощью корректирующих витков. Известно, что в циклотронах с азимутальной вариацией управляющего поля корректирующими витками “гармонического” типа меняют спектральный состав периодической составляющей поля. Если витки гармонического типа изготовить двух или более типоразмеров, то можно осуществить дополнительную модуляцию магнитного поля. В бетатронах дополнительные витки можно укладывать на поверхности полюсов и включать их на время формирования ускоряемого пучка.

Таким образом, формирование модулированных азимутально-периодических магнитных полей можно осуществить путем внесения в конструкцию полюсов более сложной симметрии расположения отдельных элементов, например, гребней полюса.

Математическое и физическое моделирование показывает, что введение более сложной симметрии позволяет получить дополнительные полезные эффекты: снижение габаритов и массы магнитопровода, улучшение условий вывода ускоренных частиц за пределы излучателя и условий охлаждения электромагнита и излучателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звонцов А.А., Казьмин В.П. Применение модулированных азимутально-периодических магнитных полей в индукционных циклических ускорителях // Сб. докл. XVII Совещания по ускорителям заряж. частиц, ГНЦ РФ ИФВЭ, Протвино, 17-20 октября 2000 г. – Протвино, 2000. – Т. 2. – С. 9–12.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Советское радио, 1967. – 607 с.
3. А. с. 360008 СССР. МКИ H05H 11/00. Электромагнит бетатрона / В.Л. Чахлов, А.А. Звонцов, А.А. Филимонов. Опубл. 1984, Бюл. № 6. – С. 216.